

공동충전재로서 각종 산업부산물을 활용한 CLSM의 현장적용 가능성 평가

Field Applicability Evaluation of Control Low Strength Materials as Utilizing Various Industrial by-Products

료효개^{1*} · 김동훈²

Xiao-kai Liao^{1*} · Dong-Hun Kim²

(Received September 4, 2020 / Revised October 5, 2020 / Accepted October 12, 2020)

In this research, a physical property test of CLSM, which can safely and effectively utilize a great number of industrial byproducts and waste types, was used to review the applicability of GBFS, FNS, and FGB, as well as their field applicabilities as cavity fillers, and the following conclusions have been reached. first, For CLSM utilizing GBFS, FNS, and FGB, it was revealed that a proper mixing of over 30% of GBFS and FNS or within 5% of FGB is effective in improving the fluidity for field application. second, It was revealed that GF15B5 can suppress bleeding at a similar level as the base, whereas GF30B5 can do so at about 0.17% compared to the base. It was also verified that GF15, GF30, and GF45 can suppress bleeding at about 0.2%, 0.26%, and 0.3%, respectively, compared to the base. third, Both GF15B5 and GF30B5 exceeded 0.4MPa in 7day strength tests to satisfy the field application and, also, the rates of increase of their initial strengths were found to be 323% and 233% higher than the base, respectively. Meanwhile, the 7day strength test of GF, which utilizes GBFS and FNS, also reached over 0.2MPa for field application, and it was revealed that GF15, GF30, and GF45 show 160%, 237%, and 185% higher strength increase rates, respectively, compared to the base.

키워드 : 슬러리재료, 공동충전재, 플라이애쉬, 고유동성, 재활용

Keywords : Slurry materials, Cavity fillers, Fly ash, High flowable, Recycling

1. 서론

ACI Committe 229(1994)에서는 CLSM(Control Low Strength Materials, 이하 CLSM)을 재령 28일의 압축강도를 8.3N/mm² 이하로 제어시킨 슬러리계 퇴매움 재료로 정의하고 있다. 또한, 일본의 “유동화 처리토 이용 기술 매뉴얼(2008)”에서는 “제어형 저강도 재료”로 즉, 제어된 저강도 재료로 정의되고 있는 유동화처리토의 일종이다.

슬러리계 재료는 오래전부터 세계 각국에서 사용되었던 재료로 북미의 경우 유동성 충전재, 유동성 모르타르, 소일 시멘트(Soil Cement), 무수축 충전재 등 여러 가지 의미의 재료로 개발되었다. 하지만, 공통의 재료성능에 대한 규정이 명확하지 않았던 관계로 건설 분야에의 혼란을 불러일으켜 실제적인 사용이 힘들었던 재료

이다. 또한, Horiguchi et al.(2011)에 의하면, 일본의 경우에서도 시멘트 고화재 등의 각종 유동화 재료의 의미로 여러 가지 재료를 활용한 CLSM이 개발되었으나, 품질관리의 규정에 대한 명확한 내용이 부족하여 현장에서의 적용에 있어 많은 부분 한계가 있었다. 하지만, ACI Committe 229(1994) 및 “유동화 처리토 이용 기술 매뉴얼(2008)”에서 CLSM의 현장적용에 따른 품질관리규정이 만들어지면서부터 각종 산업부산물 및 건설 발생토 등의 적절한 유효 이용이 현재까지 이루어지고 있다.

Kim et al.(2012)에서 CLSM의 가장 큰 특징은 산업부산물 및 폐기물을 다량으로 유효 또는 경제적으로 사용할 수 있다는 점과 압축강도의 최소치가 아닌 최대치가 제어된다는 것이다. 즉, 소요 강도 이상의 성능을 가지면서 또한, 장기적으로는 일정강도(8.3N/mm²) 이하로 제어된 슬러리계 재료이다.

* Corresponding author E-mail: 97421053@hanmail.net

¹동명대학교 건축공학과 박사과정 (Department of Architectural Engineering, Tong Myong University, Busan, 12345, Korea)

²동명대학교 건축공학과 겸임교수 (Department of Architectural Engineering, Tong Myong University, Busan, 23456, Korea)

또한, Mizuguchi et al.(2004)에서 CLSM은 고유동성 및 자기 충전성, 자기 경화성 등의 성능을 가지고 있어 협소한 공간으로 다짐 작업이 어려운 현장 등의 되메움 및 공동충전재로 이용하면 대단히 효과적이므로 건설 분야에의 광범위한 적용이 가능한 슬러 리계의 되메움 재료이다.

나아가, Horiguchi et al.(2004)에서 CLSM은 배척플랜트로부터 출하되기 때문에 전용의 플랜트 설비가 불필요하므로 현장에서 필요한 양을 트럭믹서에 옮겨 현장까지 충분히 운반할 수 있다. 또한, CLSM은 진동 다짐 등이 불필요한 재료로 롤러(Vibrating Roller) 및 탬퍼(Tamper) 등의 다짐용 장비가 필요치 않아, 인건비 등의 공사비용 절감이 가능하다. 이러한 CLSM의 우수한 시공성은 특히, 타설 및 경화, 양생과정에서의 시공속도 또한 향상 시킬 수 있으므로 도로 및 노면(Road Surface) 하부의 공동현상 (Cavitation)은 물론 지반침하에 기인하는 땅거짐 현상 즉, 포토홀 (Pot Hole) 및 싱크홀(Sink Hole) 등의 보수·보강공사와 같이, 조 기에 공사를 완료하여 빠른 시일내에 교통개시가 요구되는 현장 등에 적용하면 대단히 효과적인 재료로 판단된다.

CLSM의 주 사용재료는 현시점에서 플라이애쉬(Fly Ash, 이하 FA) 및 잔골재가 주로 사용되고 있으나, 고로슬래그미분말 (Granulated Blast Furnace Slag, 이하 GBFS) 및 페로니켈슬래그 잔골재(Ferronickel Slag for Fine Aggregate, 이하 FNS), FRP페 재 및 유리페자재(Foam Glass) 등의 각종 산업부산물 및 폐기물은 물론 하수슬러지 등의 도심형 리사이클링 재료에 이르기까지 다양 한 형태의 재생자원을 대체 재료로서 충분히 검토해 볼 수 있다.

본 연구에서는 다량의 산업부산물을 재활용하여 현장에 적용한 사례가 선진외국 대비 저조한 국내의 실정을 감안하여 다량의 산 업부산물 및 폐기물을 안전하게 유효 활용할 수 있는 CLSM의 기 초적 물성시험을 통해 공동충전재로서의 현장적용 가능성을 검토 하고자 한다. 즉, FA를 혼합한 CLSM을 Base 배합으로 설정하고 FA의 대체 재료로서 GBFS, 잔골재의 대체 재료로서 FNS 및 FGB (발포유리비드 : Foamed Glass Bid, 이하 FGB)를 복합적으로 활 용한 CLSM의 물성시험을 통해 FA 및 잔골재의 대체 재료로서의 적용 가능성을 우선적으로 검토하고 한다.

특히, 본 연구에서는 기존 연구와의 차별성을 부각시키기 위해 CLSM의 주요 사용재료인 FA 및 잔골재의 대체 재료로서 각종 산 업부산물의 활용 방안을 적극적으로 검토하기 위하여 GBFS 및 FNS, FGB를 복합적으로 활용한 CLSM의 현장적용 방안을 검토하 였다. 나아가 GBFS 및 FNS, FGB를 복합적으로 활용한 CLSM의 현장적용 방안으로서 도로 및 노면하부의 공동현상은 물론 최근 사회문제로 그 심각성이 대두되고 있는 포토홀 및 싱크홀 등의

공동충전재로서의 적용 가능성에 대해서도 검토하고자 한다.

이를 통해 선진외국 대비 재생자원의 유효 재활용을 향상시킴 은 물론 국내에서의 CLSM 확대적용 및 보급을 위한 기초적인 자 료로 제안하고자 한다. 나아가 지금까지는 하중을 지지하지 않는 되메움 및 뒷채움 재료로 일부 적용되던 것을 도로 및 노면 하부는 물론 포토홀 및 싱크홀 등의 공동충전재로서의 현장적용을 위한 적정 품질기준을 제안하고자 한다.

2. 실험계획

2.1 실험재료

본 실험에서는 GBFS 및 FNS, FGB를 복합적으로 활용한 CLSM 의 물성 평가를 위해 다음과 같은 재료를 이용하여 실험을 실시하 였다. 시멘트는 보통포틀랜드시멘트(비표면적 : 3,150cm²/g), FA 는 KS L 5405에 규정된 2종(비표면적 : 3,370cm²/g, 밀도 : 2.18g/cm³)을 사용하였다. 또한, GBFS는 KS F 2563에 규정된 3종 (비표면적 : 3,980cm²/g, 밀도 : 2.80g/cm³)을 사용하였고, FNS는 KS F 2502의 페로니켈슬래그잔골재(밀도 2.89g/cm³)를 FGB는 발포유리비드(밀도 : 1.80g/cm³)를 사용하였다. 또한, 잔골재는 낙 동강에서 채취한 천연모래(밀도 : 2.59g/cm³)를 선별하여 사용하 였고, 배합수는 일반 상수도를 사용하였다. 본 실험에서 사용한 재료는 Fig. 1, 물성은 Table 1과 같다.

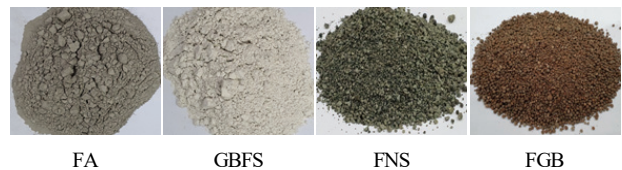


Fig. 1. Use materials

Table 1. Physical properties of use materials

	Density (g/cm ³)	Specific surface area (cm ² /g)	Absorbing ratio (%)
Cement	3.16	3,150	·
FA	2.18	3,370	·
GBFS	2.80	3,980	·
FNS	2.89	·	0.4
FGB	1.89	·	2.15
Sand	2.59	·	1.13
AE	AE agent for mortar and concrete		
Water	Waterworks		

2.2 배합 및 공시체, 양생

본 실험에서는 단위시멘트량(kg/m³) 20, f/a(FA와 잔골재 S의 용적비율 : a는 FA와 S의 합계용적)는 25%로 고정하고, 현장적용을 위한 목표 플로우 값 200±20mm(최소 160mm 이상)를 얻는데 필요한 최소단위수량을 설정하는 방법으로 CLSM의 배합을 최종 결정하였다. 배합표는 Table 2와 같다.

한편, 배합은 모르타르 믹서기(5, 20L)를 이용하여 각 배합별로 비빔을 완료하였다. 각 배합별 비빔은 시멘트 및 분체(FA, GBFS, FNS, FGB), 잔골재를 먼저 혼합하여 1분간 건비빔을 실시한 후, AE제가 첨가된 배합수를 믹서에 첨가하여 30초간 더 비빔을 실시하였다. 비빔을 완료한 시료는 아크릴 몰드(Ø 50×100mm)를 이용하여 일축압축강도용 공시체를 제작하였다. 제작한 공시체는 24시간 경과 후에 탈형하여 기중 양생을 실시하였으며, 이후 재령 3, 7, 14, 28일의 일축압축강도시험을 실시하였다. 본 실험에서 사용한 공시체 및 모르타르 믹서기, 공시체의 양생과정은 Fig. 2와 같다.

Table 2. Mixture proportions of CLSM

Item	f/a	Unit weight(kg/m ³)						Flow (mm)	Air (%)	
		W	C	FA	GBFS	FGB	FNS			S
Base	25	308	20	413	·	·	·	1271	182	4.8
GF15B5*		308	20	351	62	64	190	1017	155	5.1
GF30B5		308	20	289	124	64	381	826	197	5.3
GF15		308	20	351	62	·	191	1080	162	4.9
GF30		308	20	289	124	·	381	890	208	5.2
GF45		308	20	227	186	·	572	699	218	5.4

* GF(GBFS+FNS), B(FGB), 5,15,30,45 = Replacement Ratio.

※ Temperature 20°C, Moisture 60%



Fig. 2. Specimen and mixer, curing process

2.3 시험항목

ACI Committe 229(1994) 및 “유동화 처리토 이용 기술 매뉴얼 (2008)”에 의하면 FA를 주 사용재로 활용한 CLSM의 경우 최소 단위수량의 설정에 따른 플로우 및 블리딩, 일축압축강도를 기준으로 CLSM의 공학적 특성 및 현장적용에 따른 품질기준을 평가하고 있다. “유동화 처리토 이용 기술 매뉴얼(2008)”의 CLSM 사용 용도별 품질기준은 Table 3과 같다.

Table 3. Use quality of CLSM*

Use	Test item	Standard limit	Test method
Building underground structures backfill	Flow	160mm~	Once/50m ³
	Strength	200kN/m ² (7day)	Once(3ea)/day
Civil underground structures backfill	Flow	160mm~	Once/50m ³
	Strength	200kN/m ² (7day)	Once(3ea)/day
Underground space filling	Flow	160mm~	Once/50m ³
	Strength	200kN/m ² (7day)	Once(3ea)/day
Footing around backfill	Flow	160mm~	Once/50m ³
	Strength	300kN/m ² (7day)	Once(3ea)/day

*Hokkaido Civil Technical Concrete Research Committee. (2006). CLSM Use Manual. CLSM Supply Review Committee.

2.3.1 플로우 시험

Horiguchi et al.(2001)에서 CLSM의 유동성 평가는 플로우 시험을 통해 얻어진 값을 그 기준으로 평가하고 있다. 특히, 북미 및 일본의 경우는 CLSM의 자기수평성 및 원활한 유동성의 확보를 위해 플로우 값에 대한 기준치를 설정하고 있는데 ACI Committe 229(1994)에서는 200mm 이상, “유동화 처리토 이용 기술 매뉴얼 (2008)”에서는 160mm 이상 또한, 현장적용에서는 200±20mm으로 설정하고 있다.

본 실험에서는 GBFS 및 FNS, FGB를 복합적으로 활용한 CLSM의 유동성 및 현장 적용성을 고려하여 목표 플로우 값을 200±20mm(최소 160mm)로 설정하였다. 플로우 시험은 KS F 2594에 규정된 굳지 않은 콘크리트의 플로우 시험방법에 기준하여 실험을 실시하였다. 플로우 시험방법은 Fig. 3과 같다.

2.3.2 블리딩 시험

Keon et al.(2013)에서 FA를 활용한 CLSM의 경우 대략적으로 1~3% 정도의 범위에서 블리딩이 발생하는 것으로 보고되고 있다. 하지만, Horiguchi et al.(2011)에서 FA를 혼합하지 않은 즉, 분체량이 적은 CLSM 경우에는 표면침하에 의한 블리딩이 약 10% 정도의 범위에서 발생하는 것으로 보고되고 있다.

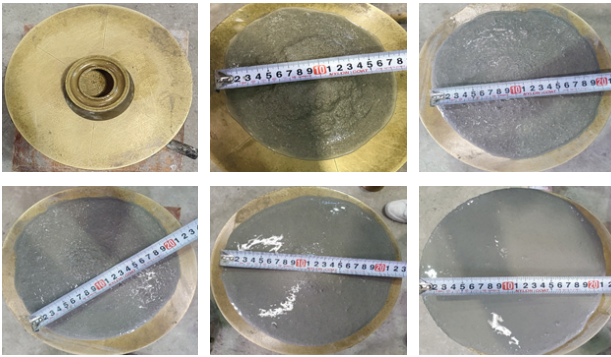


Fig. 3. Flow test method

블리딩 제어는 CLSM의 재료분리저항성에 많은 영향을 미치는 주요 항목으로 특히, 충전 개소의 공극 및 표면침하의 요인이 될 수 있기 때문에 이용용도 또는 구조물의 중요도 등 필요에 따른 타설량의 할증을 고려해 두는 것이 필요하다. 본 실험에서는 JSCE-F 522-1999에 규정된 프리팩트콘크리트 주입 모르타르의 블리딩을 시험방법에 의거하여 20시간 이후의 최종침하량을 측정하였다. 블리딩 시험방법은 Fig. 4와 같다.

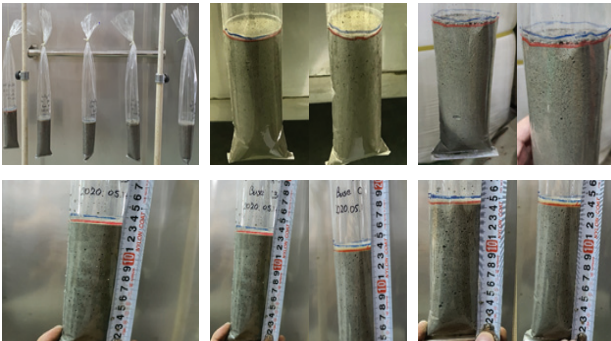


Fig. 4. Bleeding test method

2.3.3 일축압축강도 시험

ACI Committe 229(1994) 및 “유동화 처리토 이용 기술 매뉴얼 (2008)”에 의하면, CLSM의 일축압축강도는 사용 용도에 따라 시멘트 및 모래의 첨가량을 변화시키는 방법으로 강도를 설정하는 방법이 가장 일반적으로 많이 사용되고 있다. 또한, CLSM의 강도 평가는 일축압축강도의 크기로 평가되고 있으나, 용도 및 적용 개소에 따라 특별한 강도 정수가 적용되어 평가되는 경우도 있다.

본 실험에서는 CLSM 전용의 CBR 압축강도시험기를 이용하여 KS F 2426에 규정된 일축압축강도 시험방법에 의거 재령 3, 7, 14, 28일의 일축압축강도를 측정하였다.

2.3.4 용출시험

본 실험에서는 FA 및 GBFS, FNS, FGB 등 각종 산업부산물을 혼합한 CLSM이 주변 환경에 미치는 영향을 검토하기 위하여 환경부 폐기물 공정시험방법에 의거하여 CLSM의 용출시험을 실시하였다.

Horiguchi et al.(2011) 및 Kim et al.(2012)에 의하면, 일반적으로 시멘트계 슬러리재료 및 개량토로부터 용출되는 것으로 알려진 육각크롬(이하, Cr)의 경우 대량의 지하수 및 침투수가 유입되는 곳을 제외하고는 Cr 등의 유해 물질이 주변 환경에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 보고되고 있다.

본 실험에서는 Cr 이외 비소(이하, As), 납(이하, Pb), 카드뮴(이하, Cd), 셀렌(이하, Se) 등 5대 중금속의 금속이온 농도를 측정하는 방법으로 각종 산업부산물을 혼합한 CLSM이 주변 환경에 미치는 영향을 검토하였다. 한편, 각 중금속 이온의 표준허용기준은 환경부 수질오염 물질의 배출허용 기준(제 34조, 청정지역)에 의거하여 시험을 실시하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 유동성 시험결과

FA 및 잔골재의 대체 재료로서 GBFS 및 FNS, FGB를 복합적으로 활용한 CLSM의 플로우 시험결과는 Fig. 5와 같다. 그림으로부터 GBFS 및 FNS를 각각 15%, FGB를 5% 혼합한 CLSM(GF15B5)의 경우는 Base 대비 플로우가 크게 감소하여 “유동화 처리토 이용 기술 매뉴얼(2008)”의 현장적용 기준치인 160mm 이상을 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 잔골재의 대체 재료로 활용한 FGB의 높은 흡수율이 영향을 미친 것으로 판단된다. 본 실험의 결과에서는 GBFS 및 FNS를 각각 15%, FGB를 5% 범위에서 혼합하는 경우에는 AE제를 0.3~0.35(% kg/m³) 범위에서 적정 혼합하면 현장적용을 위한 유동성 확보에 유효한 것으로 확인되었다.

한편, GBFS 및 FNS를 각각 30%, FGB를 5% 혼합한 CLSM(GF30B5)의 경우는 Base 대비 플로우가 증가하여 본 실험에서 현장적용을 위해 설정한 목표 플로우인 200±20mm를 만족하는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 GBFS 및 FNS의 혼합량 증가가 유동성 증가에 영향을 미친 것으로 본 실험의 결과로부터 GBFS 및 FNS를 각각 30% 이상 혼합하면 현장적용을 위한 유동성 개선에 효과적인 것으로 판단된다.

또한, 그림으로부터 FA 및 잔골재의 대체 재료로서 GBFS 및

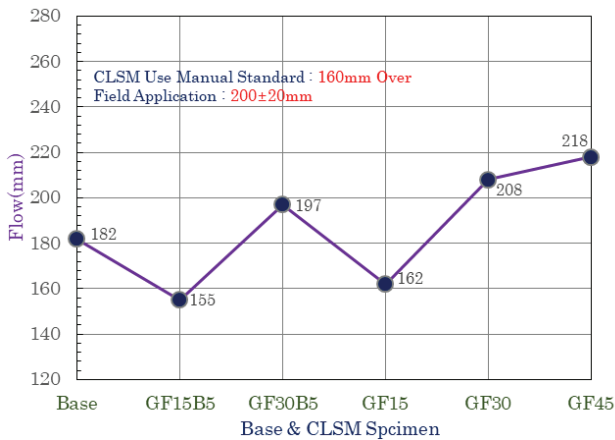


Fig. 5. Result of flow test

FNS를 각각 복합적으로 활용한 CLSM의 시험결과에서는 먼저 GBFS 및 FNS를 각각 15% 혼입한 GF15의 경우는 Base 대비 낮은 플로우가 나타나는 것으로 파악되었다. 하지만, “유동화 처리토 이용 기술 매뉴얼(2008)”의 현장적용 기준치인 160mm 이상은 만족하는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 FNS 대비 잔골재의 높은 흡수율이 플로우 감소에 영향을 미친 것으로 본 실험의 결과에서는 GBFS 및 FNS를 각각 15% 범위에서 활용하는 경우는 AE제를 0.25~0.3(% , kg/m³) 범위에서 적정 혼입하면 유동성 개선에 유효한 것으로 확인되었다.

하지만, 그림으로부터 GBFS 및 FNS를 각각 30% 및 45% 혼입한 GF30 및 GF45의 경우는 GF15 대비 플로우가 크게 증가함은 물론 Base 대비 각각 114% 및 119% 정도 플로우가 증가하여 목표 플로우인 200±20mm를 만족하는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 GBFS 및 FNS의 혼입량 증가가 CLSM의 유동성 거동에 영향을 미친 것으로 판단된다.

이러한 결과로부터 FA 및 잔골재의 대체 재료로서 GBFS 및 FNS를 복합적으로 활용하는 CLSM의 경우 GBFS 및 FNS를 각각 30%~45% 적정 혼입하면 현장적용을 위한 목표 플로우의 확보에 효과적인 것으로 확인되었다. 본 실험의 결과에서는 GBFS 및 FNS를 각각 30%~45% 범위에서 복합적으로 활용하는 경우 AE제를 0.15~0.2(% , kg/m³) 정도 혼입하면 현장적용을 위한 유동성 확보에 유효한 것으로 나타났다.

3.2 블리딩 시험결과

FA 및 잔골재의 대체 재료로서 GBFS 및 FNS, FGB를 복합적으로 활용한 CLSM의 블리딩 시험결과는 Fig. 6과 같다. 그림으로부터

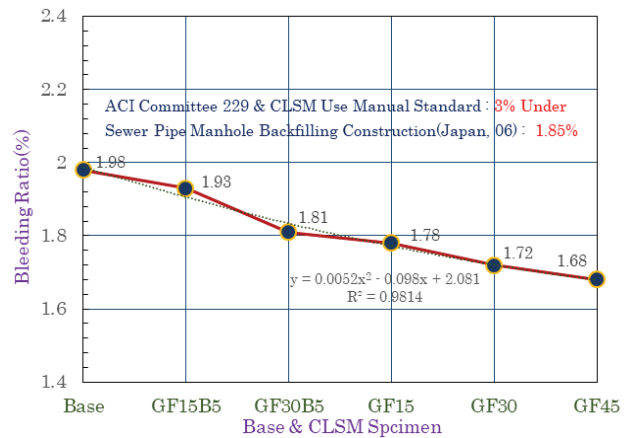


Fig. 6. Result of bleeding test

터 GBFS 및 FNS, FGB를 복합적으로 활용한 CLSM의 블리딩율이 Base 대비 전체적으로 낮은 것으로 파악되었다.

각 배합별 시험결과에서는 먼저 GBFS 및 FNS를 15% 혼입하고 FGB를 5% 혼입한 GF15B5의 경우는 Base 대비 거의 동등 정도인 1.93% 정도의 블리딩율이 나타나는 것으로 파악되었다. 이러한 결과로부터 FA 및 잔골재의 대체 재료로서 GBFS 및 FNS, FGB를 복합적으로 활용하는 CLSM의 경우 비교적 적은 범위에서의 혼입율은 CLSM의 블리딩율 제어에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

한편, GBFS 및 FNS를 30% 혼입하고 FGB를 5% 혼입한 GF30B5의 경우는 1.81%의 블리딩율이 파악되어 Base 대비 0.17% 정도 블리딩율이 낮게 나타나는 것으로 파악되었다. 이러한 경향은 GBFS 및 FNS의 혼입량 증가가 영향을 미친 것으로 본 실험의 결과, FGB를 잔골재의 대체 재료로서 5% 활용하는 경우에는 GBFS 및 FNS를 각각 30% 범위에서 혼합하면 유동성 개선을 통한 블리딩 제어에 효과적인 것으로 확인되었다.

또한, 그림으로부터 GBFS 및 FNS를 복합적으로 활용한 CLSM의 경우 Base 대비 낮은 블리딩율을 나타낸 것은 물론 전술의 FGB 혼입 CLSM 대비 블리딩의 제어 효과가 우수한 것으로 파악되었다. 본 실험의 결과에서는 먼저 GBFS 및 FNS를 각각 15% 혼입한 것은 블리딩율이 1.78% 정도로 Base 대비 약 0.2% 정도 범위에서 블리딩을 제어할 수 있는 것으로 파악되었다. 나아가 GBFS 및 FNS를 각각 30% 및 45% 혼입한 GF30 및 GF45의 경우 블리딩율이 각각 1.72% 및 1.68% 정도로 파악되어 Base 블리딩율을 0.26~0.3%까지 제어할 수 있는 것으로 나타났다. 이러한 결과로부터 FA 및 잔골재의 대체 재료로서 GBFS 및 FNS를 30~45% 범위에서 적정 혼입하면 현장적용을 위한 유동성 확보는 물론 표면침하

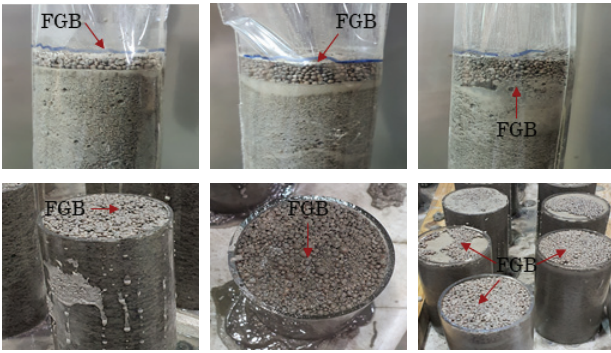


Fig. 7. Buoyancy phenomenon of FGB

에 따른 블리딩의 제어에도 효과적으로 대응 가능할 것으로 판단된다.

하지만, Fig. 7로부터 본 실험의 결과 FGB를 잔골재의 대체 재료로서 5% 이상 활용하는 경우에는 재료 자체의 높은 흡수율과 경량화에 따른 FGB의 부력(浮力, Buoyance) 현상으로 적정 혼합 분산을 통한 타 재료와의 일체화가 어려운 것으로 확인되었다. 본 실험에서는 충분한 예비시험을 통해 FGB를 잔골재의 대체 재료로 활용하는 경우에는 유호 적정 혼입율을 5% 이하로 제어하는 것이 타 재료와의 일체를 통한 유동성 개선 및 블리딩 제어, 표면 미세공극 등의 발생을 억제 할 수 있을 것으로 확인되었다. 향후, CLSM의 대체 재료로서 FGB를 활용하는 경우에는 다양한 종류의 FGB를 대상으로 한 추가적인 물성시험을 통해 GBFS 및 FNS와 복합적으로 다양 활용할 수 있는 연구가 뒷받침되어야 할 것으로 판단된다.

3.3 일축압축강도 시험결과

GBFS 및 FNS, FGB를 복합적으로 활용한 CLSM의 일축 압축강도 시험결과는 Fig. 8과 같다. 그림으로부터 먼저 GBFS 및 FNS를 각각 15% 혼입하고 FGB를 5% 혼입한 GF15B5의 3일 강도는 Base 대비 비교적 낮은 강도가 파악되었다. 하지만, GBFS 및 FNS를 각각 30% 혼입하고 FGB를 5% 혼입한 GF30B5의 경우는 Base 대비 동등 정도의 강도가 확인되었다. 또한, “유동화 처리토 이용 기술 매뉴얼”에서의 현장적용을 위한 7일 강도 시험결과, 0.2MPa를 초과하는 0.4MPa 이상의 강도가 나타나는 것으로 파악되어 현장적용 기준을 만족함은 물론 Base 대비 약 2배 이상의 강도가 증가하는 것으로 확인되었다.

특히, 본 실험의 결과 3일에서 7일 강도에 이르는 강도증가비율이 Base 116% 대비 GF15B5 및 GF30B5의 경우는 각각 323% 및 233% 정도로 Base 대비 높은 강도증가비율을 나타내는 것으로 파악되었다. 이러한 경향은 시멘트 및 FA 대비 비교적 고미분말의

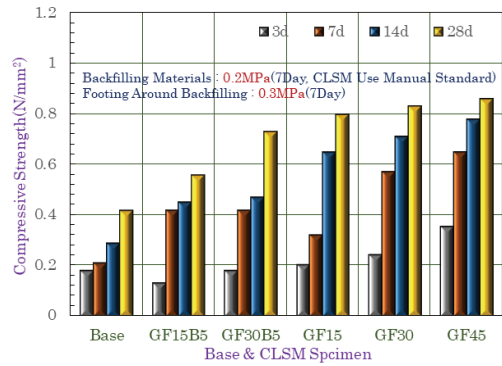


Fig. 8. Result of compressive strength test

GBFS 혼입에 의한 CLSM의 내부치밀화가 초기강도의 증가에 영향을 미친 것으로 판단된다. 이러한 결과로부터 FA 및 잔골재의 대체 재료로서 GBFS 및 FNS, FGB를 복합적으로 활용하는 경우 GBFS 및 FNS는 15~30%, FGB는 5% 이하의 범위에서 적정 혼입하면 도로 및 노면하부는 물론 포도홀 등의 공동충전재로서 빠른 시일 내에 충분한 초기강도의 확보가 요구되는 현장에의 적용이 가능한 것으로 판단된다.

한편, 그림으로부터 FA 및 잔골재의 대체 재료로서 각각 GBFS 및 FNS를 복합적으로 활용한 CLSM의 경우에는 비교적 초기단계에서부터 Base를 상회하는 강도 거동이 파악되었다. 또한, “유동화 처리토 이용 기술 매뉴얼(2008)”에서의 현장적용 기준인 7일 강도 시험결과에서도 Base 강도(0.21MPa) 대비 GBFS 및 FNS를 각각 15% 혼입한 GF15는 0.32MPa로 Base 대비 약 1.5배 정도 강도가 높게 나타나는 것으로 확인되었다. 또한, GBFS 및 FNS를 각각 30% 및 45% 혼입한 GF 30 및 GF45의 경우는 각각 0.57 및 0.65MPa 정도로 Base 강도 대비 각각 2.7 및 3.1배 정도 강도가 높게 나타나는 것으로 확인되었다.

나아가 본 실험의 결과 3일에서 7일 강도에 이르는 강도증가비율에서도 Base의 강도증가비율인 116% 대비 GF15는 160% 정도의 강도증가비율을 나타내었고 또한, GF30 및 GF45는 각각 237% 및 185% 정도의 강도증가비율이 나타나는 것으로 파악되어 Base 대비 높은 강도증가비율이 확인되었다. 또한, GBFS 및 FNS를 각각 혼입한 GF의 경우 14일 및 28일까지의 시간 경과에 따른 지속적인 강도 거동에 있어서도 Base 대비 동등 정도의 강도증가비율을 나타내는 것으로 확인되었다.

이러한 결과로부터 FA 및 잔골재의 대체 재료로서 GBFS 및 FNS를 각각 15%~45% 범위에서 적정 치환하여 혼합하면 Base 대비 현장적용을 위한 높은 초기강도의 확보는 물론 공동충전재로서의 적정 품질의 강도관리가 가능한 것으로 판단 된다. 본 실험의

결과에서는 FA 및 잔골재의 대체 재료로서 GBFS 및 FNS를 복합적으로 활용하는 경우 혼입율을 최소 30% 이상 최대 45%까지 혼입하면 공동충전재로서 도로 및 노면하부는 물론 포토홀 및 싱크홀 등의 보수·보강공사에서와 같이 특히, 조기에 공사를 완료하여 빠른시일 내에 교통개시가 요구되는 현장 등에 적용하면 대단히 효과적인 것으로 판단된다.

3.4 용출시험결과

GBFS 및 FNS, FGB를 복합적으로 활용한 CLSM의 용출시험결과는 Table 4와 같다.

본 실험에서는 Cr 이외 A_s 및 P_b, C_d, S_e 등의 금속이온 농도를 측정하는 방법으로 각종 산업부산물을 복합적으로 혼입한 CLSM이 주변 환경에 미치는 영향을 검토하였다.

Table 4로부터 Base 공시체를 포함하여 GBFS 및 FNS, FGB를 복합적으로 활용한 모든 CLSM 공시체로부터 Cr 이외 A_s 및 P_b, C_d, S_e 등은 거의 금속이온의 농도가 존재하지 않는 것으로 파악됨은 물론 환경부 수질오염 물질 배출허용 기준에도 모두 기준치 이하의 금속이온이 용출되는 것으로 확인되었다. 이러한 결과로부터 GBFS 및 FNS, FGB를 복합적으로 활용한 CLSM의 경우 각종 산업부산물의 사용에 의한 금속이온의 용출이 주변 환경에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 판단된다.

하지만, 본 실험의 결과 Table 4로부터 Base 대비 GBFS 및 FNS, FGB를 복합적으로 활용한 GF15B5 및 GF30B5, GF30, GF45의 경우 Cr의 농도가 비교적 높게 용출되어 배출허용 기준에 근접하는 것으로 확인되었다. 이러한 경향은 FA를 주 사용재료로 활용한 Base 대비 GBFS 및 FNS, FGB 등을 복합적으로 혼합하여 사용한 것이 금속이온의 농도 상승에 영향을 미친 것으로 판단된다. 이러한 결과로부터 GBFS 및 FNS, FGB를 복합적으로 활용한 CLSM의 경우 현장적용에 있어 특히, 주변 환경에 대량의 지하

수 및 침투수가 유출되는 환경하에서는 Cr 용출에 따른 환경적 안전성 검토가 필요한 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 다량의 산업부산물 및 폐기물을 안전하게 유효 활용할 수 있는 CLSM의 기초적 물성시험을 통해 FA 및 잔골재의 대체 재료로서 GBFS 및 FNS, FGB의 적용 가능성을 검토하였다. 나아가, 도로 및 노면하부, 포토홀 등의 공동충전재로서의 현장적용 가능성에 대해서도 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. GBFS 및 FNS, FGB를 활용하는 CLSM의 경우 GBFS 및 FNS는 각각 30% 이상, FGB는 5% 이내에서 적정 혼합하면 현장 적용을 위한 유동성 개선에 유효한 것으로 나타났다.
2. GBFS 및 FNS, FGB를 복합적으로 활용한 CLSM의 경우 Base 대비 전체적으로 낮은 불리딩율이 파악되었다. 본 실험의 결과 GF15B5는 Base 대비 동등 정도 GF30B5는 Base 대비 0.17% 정도 불리딩을 억제할 수 있는 것으로 나타났다. 또한, GBFS 및 FNS를 활용한 CLSM 경우는 Base 대비 GF15는 0.2%, GF30 및 GF45는 각각 0.26 및 0.3% 정도 불리딩을 억제할 수 있는 것으로 확인되었다.
3. GBFS 및 FNS, FGB를 활용한 GF15B5 및 GF30B5 모두 7일 강도가 0.4MPa를 초과하여 현장적용을 만족하였고 또한, 초기강도의 증가비율이 Base 대비 각각 323% 및 233% 정도 높게 나타나는 것으로 파악되었다. 한편, GBFS 및 FNS를 활용한 GF의 경우도 현장적용을 위한 7일 강도가 0.2MPa 이상을 모두 만족하였고 또한, Base 대비 GF15는 160%, GF30 및 GF45는 각각 237% 및 185% 정도의 높은 초기강도의 증가비율을 나타내는 것으로 확인되었다.
4. GBFS 및 FNS, FGB를 복합적으로 활용한 CLSM의 경우 Cr 이외 A_s 및 P_b, C_d, S_e 등은 거의 금속이온의 농도가 존재하지 않는 것으로 파악되었다. 하지만, Cr의 농도가 비교적 높게 용출되는 것으로 파악되어 대량의 지하수 및 침투수가 유입되는 환경하에서는 Cr의 용출에 의한 환경적 안전성 검토가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

Table 4. Result of gush test

Test item	Metal concentration(mg/L)				
	Cr*	As	Cd	Pb	Se
Base	0.064	0.001	0.002	0.004	0.001
GF15B5	0.083	0.004	0.003	0.006	0.005
GF30B5	0.088	0.004	0.003	0.008	0.005
GF15	0.071	0.001	0.001	0.002	0.001
GF30	0.076	0.001	0.001	0.002	0.002
GF45	0.079	0.002	0.002	0.003	0.002
Standard*	0.1	0.1	0.02	0.1	0.01

* Concentration of total Cr value(hexavalent chromium measurement)

** Effluent quality standard of water pollutants(Environment, 2007)

Conflicts of interest

None.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단 이공분야기초연구사업 개인기초연구 지원사업(2018R1D1A1B0704681413)에 의해 수행되었습니다.

References

ACI Committee 229 (2013). Controlled Low Strength Materials, ACI Manual of Concrete Practice, ACI 229 R(13).

Civil Research Institute Ministry of Construction Japanese Government (2008). Liquefied Stabilized Soil (CLSM) Uses Technical Manual, Gibodan Publishing Company.

Halmen, S., Shah, H. (2015). Controlled low-strength materials composed solely of by-products, *ACI Materials Journal*, **112(2)**, 239–246.

Hokkaido Civil Technical Concrete Research Committee (2006). CLSM Use Manual, CLSM Supply Review Committee.

Horiguchi, T., Fujita, R., Shimura, K. (2011). Applicability of controlled low-strength materials with incinerated sewage sludge ash and crushed-stone powder, *Journal of Materials in Civil Engineering*, **23(6)**, 767–769.

Horiguchi, T., Okumura, H., Saeki, N. (2001). Durability of CLSM with used foundry sand bottom ash in cold regions, *ACI Special*

Publication SP, **200(2)**, 325–348.

Horiguchi, T., Okumura, H., Saeki, N. (2001). Optimization of CLSM mixture proportion with combination of clinker ash and fly ash, *ACI Special Publication SP*, **199(1)**, 307–324.

Horiguchi, T., Saeki, N. (2004). Compressive strength and leachate characteristics of new green CLSM with ecocement and melted slag from municipal solid waste, *ACI Special Publication SP*, **221(6)**, 529–558.

Keon, C.W., Lim, N.G. (2013). Fundamental properties of low strength concrete mixture with blast furnace slag and sewage sludge, *Journal of the Korea Institute of Structural Maintenance and Inspection*, **17(3)**, 136–144.

Kim, D.H., Lim, N.G., Horiguchi, T. (2012). Rational method of CLSM mixture with sewage sludge cinder, *Journal of Concrete Institute*, **24(4)**, 465–472.

Mizuguchi, O., Onodera, T., Horiguchi, T., li, H. (2004). Application of CLSM(controlled low strength materials) in Japan, *Journal of Concrete Institute of Japan*, **42(10)**, 19–28.

Raghavendra, T., Sunil, M., Udayashankar, BC. (2016). Controlled low-strength materials using bagasse ash and fly ash, *ACI Materials Journal*, **113(4)**, 447–457.

Wei, C., John, R., Kenneth, C.H. (2019). High-volume carbon sequestration for controlled low-strength materials, *ACI Materials Journal*, **116(4)**, 235–244.

공동충전재로서 각종 산업부산물을 활용한 CLSM의 현장적용 가능성 평가

본 연구에서는 다량의 산업부산물 및 폐기물을 안전하게 유효 활용할 수 있는 CLSM의 기초적 물성시험을 통해 FA 및 잔골재의 대체 재료로서 GBFS 및 FNS, FGB의 적용가능성을 검토하였다. 나아가, 도로 및 노면하부, 포토홀 등의 공동충전재로서의 현장적용 가능성에 대해서도 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 첫째, GBFS 및 FNS, FGB를 활용한 CLSM의 경우 GBFS 및 FNS는 각각 30% 이상, FGB는 5% 이내에서 적정 혼합하면 현장적용을 위한 유동성 개선에 유효한 것으로 나타났다. 둘째, GF15B5는 Base 대비 동등 정도의 불리딩율이 GF30B5는 Base 대비 0.17% 정도 불리딩을 억제할 수 있는 것으로 나타났다. 또한, Base 대비 GF15는 0.2%, GF30 및 GF45는 각각 0.26% 및 0.3% 정도 불리딩을 억제할 수 있는 것으로 확인되었다. 셋째, GF15B5 및 GF30B5 모두 7일 강도가 0.4MPa를 초과하여 현장적용을 만족하였고 또한, 초기강도의 증가비율이 Base 대비 각각 323% 및 233% 높게 나타나는 것으로 파악되었다. 또한, GF의 경우도 현장적용을 위한 7일 강도가 0.2MPa 이상을 모두 만족하였고 Base 대비 GF15는 160%, GF30 및 GF45는 각각 237% 및 185% 정도의 높은 강도증가비율이 확인되었다. 넷째, GBFS 및 FNS, FGB를 복합적으로 활용한 CLSM의 경우 C_r의 농도가 비교적 높게 용출되는 것으로 파악되어 다량의 지하수 및 침투수가 유입되는 환경하에서는 C_r의 용출에 의한 환경적 안전성 검토가 이루어져야 할 것으로 판단된다.